

## РОЗРАХУНОК ВОЛЬТ-АМПЕРНОЇ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУНТУВАЛЬНОГО РЕАКТОРА З ПРОМІЖКАМИ В СТРИЖНІ

**В.Ф.Іванков, А.В.Басова, Н.В.Шульга**

ПАТ "Запоріжтрансформатор";

Дніпропетровське шосе, 3, Запоріжжя, 69600, Україна.

email: [victor.ivankov@ztr.com.ua](mailto:victor.ivankov@ztr.com.ua)

*Представлено розрахунок вольт-амперної характеристики реактора при насиченні магнітної системи як аналітичним методом, так і на підставі чисельного скінчено-елементного аналізу із застосуванням програмного забезпечення ANSYS. Наведено приклад розрахунку і вимірів для однофазного реактора потужністю 80 МВАр на напругу 765 кВ. Бібл. 5, рис. 8.*

**Ключові слова:** шунтувальний реактор, вольт-амперна характеристика, аналітичний метод, чисельна розрахункова модель ANSYS.

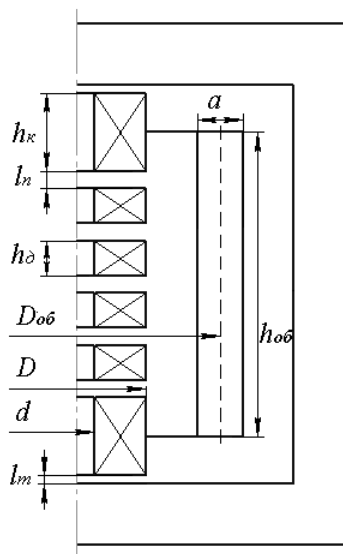
**Вступ.** Залежність між напругою живлення і струмом  $U(I)$ , що визначається як вольт-амперна, є однією з важливих характеристик шунтувальних електричних реакторів постійної потужності (ШР), які застосовуються для регулювання потоків реактивної потужності протяжних високовольтних ліній електропередачі. Для забезпечення лінійної вольт-амперної характеристики ШР при номінальній робочій напрузі застосовується стрижнева з немагнітними проміжками конструкція реактора [2] з низькими значеннями робочої щільності магнітного потоку в магнітній системі (МС) в лінійній області характеристики намагнічування холоднокатаної анізотропної електротехнічної сталі (ЕТС).

При гармонійних змінах струму  $i = \sqrt{2} I \sin \omega t$  та прикладеної напруги  $u = \sqrt{2} U \cos \omega t$  з круговою частотою  $\omega = 2\pi f$  вольт-амперна характеристика реактора визначається через потокозчеплення  $\Psi$  та індуктивність  $L$  реактора

$$U(I) = \omega \Psi(I) = \omega L(I) I . \quad (1)$$

Експлуатаційні підвищення напруги і струму в обмотці можуть призводити до переходу магнітної індукції в область насичення ЕТС, до зменшення індуктивності і, в результаті, до обмежено-лінійної характеристики  $U(I)$ .

Для визначення гарантованого діапазону збереження лінійності вольт-амперної характеристики реактора обов'язковим при типових випробуваннях є вимір індуктивності не лише при робочій напрузі, але і при підвищених значеннях, що для ШР вищих класів напруги іноді ускладнено через обмежені можливості випробувального устаткування. Тому розрахункова перевірка основних конструктивних рішень, вибору робочого значення індукції в МС стає важливою ще на стадії розрахункового проектування реактора, а також у тих випадках, коли необхідно визначити відхилення вольт-амперної характеристики ШР від лінійної поза вимірними значеннями.



**Рис. 1**

**Метою роботи** є визначення вольт-амперної характеристики ШР як аналітичним методом для оперативних розрахункових оцінок, так і уточненим методом на основі чисельної розрахункової моделі реактора (ЧРМР), розробленої із застосуванням програмного забезпечення скінчено-елементного аналізу ANSYS [4].

**Аналітичний метод розрахунку.** У сучасних конструкціях ШР вставки стрижня виконуються у вигляді циліндричних дисків з радіальною шихтовкою пластин, що зменшує втрати в дисках на вихрові струми від "випинання" магнітного потоку в стрижні МС у проміжки між дисками. Ескіз конструкції ШР показаний на рис. 1.

Стрижень МС збирається з двох крайніх дисків заввишки  $h_k$  та  $N$  внутрішніх дисків. Від горизонтальних ярем крайні диски відділяються невеликими технологічними проміжками  $l_m$ . Внутрішні диски з внутрішнім  $d$  та зовнішнім  $D$  діаметрами виготовляються однакової висоти  $h_0$  з  $N+1$  проміжками заввишки  $l_n$  між собою та крайніми дисками. МС реактора включає горизонтальні, кутові і вертикальні ділянки бічних ярем. Їхній переріз приймається таким, щоб забезпечити

ти однакові значення магнітної індукції в стрижні і в ярах. Активні перерізи дисків стрижня, планарно шихтованих ярем пластинами ЕТС МС визначаються через їхні геометричні перерізи  $S$  та відповідні коефіцієнти  $k_a$  заповнення сталлю  $S_a = Sk_a$ .

Для врахування можливого насичення МС ШР скористаємося наведеним у [2] визначенням індуктивності реактора через магнітні опори каналу між стрижнем і обмоткою  $R_{кан}$ , опором стрижня  $R_{\mu ст}$  та горизонтальних і вертикальних ділянок ярем  $R_{\mu яр}$  з урахуванням скінченних значень магнітної проникності  $\mu$  ЕТС

$$L(B) = w^2 \left[ R_{кан} R_{\mu ст} (R_{кан} + R_{\mu ст})^{-1} + R_{\mu яр} \right]^{-1} \quad (2)$$

Магнітний опір каналу між стрижнем і обмоткою  $R_{кан}$  згідно [2] визначається висотою обмотки і площею  $S_{кан}$  потокозчеплення магнітного поля обмотки з її витками по співвідношенню площі витка  $S_{об}$ , віддаленого на третину товщини обмотки  $a$  від внутрішнього витка, площі стрижня  $S_{ст}$  та площі  $S_{ст\varepsilon}$  "випинання" на величину  $\varepsilon$  магнітного потоку в проміжках стрижня по внутрішньому і зовнішньому периметрах дисків

$$R_{кан} = h_{об} / \mu_0 S_{кан}, \quad S_{кан} = (S_{об} - S_{ст} - S_{ст\varepsilon}),$$

$$S_{об} = 0,25\pi(D_{об} - a/3)^2, \quad S_{ст} = 0,25\pi(D^2 - d^2), \quad S_{ст\varepsilon} = 0,75\pi(D + d)\varepsilon. \quad (3)$$

Величина «випинання»  $\varepsilon$  визначається висотами проміжку та прилеглих до нього дисків. При обчисленні в (3)  $S_{ст\varepsilon}$  прийнято, що для усієї висоти стержня «випинання» визначається внутрішніми проміжками  $\varepsilon_e = l_n \pi^{-1} \ln(h_o l_n^{-1} + 1)$  [2]. Для технологічних проміжків між крайніми дисками і ярами може бути прийнято  $\varepsilon_m = h_m$ .

Магнітний опір стрижня дорівнює сумі послідовних опорів ЕТС крайніх, внутрішніх дисків і повітряних проміжків між ними

$$R_{\mu ст} = 2 \frac{h_m}{\mu S_{acm}} + N \frac{h_o}{\mu S_{acm}} + 2 \frac{l_m}{\mu_0 S_m} + (N + 1) \frac{l_n}{\mu_0 S_n},$$

$$S_m = 0,25\pi[(D + 2\varepsilon_m)^2 - (d - 2\varepsilon_m)^2], \quad S_n = 0,25\pi[(D + 2\varepsilon_e)^2 - (d - 2\varepsilon_e)^2]. \quad (4)$$

Магнітний опір ярем визначається спрощено сумарною довжиною осьових ліній горизонтальних і вертикальних ділянок ярем і їхнім активним перерізом  $R_{\mu яр} = l_{яр} (\mu S_{яр})^{-1}$ .

Як було вказано раніше, магнітна індукція  $B$  у стрижні, в ярах є однаковою, тому їхня магнітна проникність є також однаковою і може бути визначена по відомій залежності  $\mu(B)$  для використовуваної марки ЕТС. Введемо рівняння, яке за законом Ампера зв'язує діючі значення ампер-витків намагнічування в обмотці з падінням магнітної напруги по замкненому контуру уздовж стрижня і ярем МС

$$I(B)w = B (R_{\mu ст} S_{acm} + R_{\mu яр} S_{яр}) / \sqrt{2}. \quad (5)$$

Таким чином, вирази (2), (4), (5) зв'язуються однозначно через величину магнітної індукції  $B$  в ЕТС МС. Аналітичний розрахунок вольт-амперної характеристики реактора полягає в наступному. Здаються ряд значень індукції  $B_n$  ( $n = 1, 2, \dots$ ) як для робочих, так і в діапазоні її можливих підвищених значень. По основній кривій намагнічування визначаються величини магнітної проникності  $\mu_n(B_n)$  у сталі МС реактора. По виразах (1) – (5) проводяться обчислення параметрів  $R_n, L_n, I_n, U_n$ . Набуті таким чином дискретні значення вказаних величин визначають вольт-амперну табличну залежність  $U_n(I_n)$ .

У даній роботі як об'єкт досліджень розглянуто однофазний шунтувальний реактор потужністю 80 МВАр на номінальну напругу 765 кВ виробництва ПАТ "Запоріжтрансформатор". Для нього отримана нормована по номінальних величинах напруги і струму залежність  $U_n(I_n)$  (рис. 8 – пунктирна лінія 2). У лінійній області намагнічування при індукціях приблизно до 1,7 Тл магнітна проникність ЕТС має великі величини. В цьому випадку індуктивність (1) за рахунок малих опорів ділянок сталі МС є практично сталою величиною, що визначає лінійний характер вольт-амперної характеристики реактора. При збільшенні напруги живлення реактора вище за номінальні значення магнітна

індукція в сталі МС досягає значних величин, магнітна проникність знижується до декількох одиниць (у відносних величинах  $\mu' = \mu / \mu_0$ ). Індуктивність реактора падає, що призводить до підвищення струму в обмотці в порівнянні з тими величинами, які мали б місце за відсутності насичення ЕТС МС реактора. Тим самим проявляється обмежена лінійність вольт-амперної характеристики ШР.

**Чисельні дослідження.** Розглянутий аналітичний метод ґрунтується на спрощеному представленні магнітних потоків реактора. Уточнена модель ШР може бути створена на значно детальнішій схемі заміщення магнітними опорами елементів обмотки, сталі МС, бака і повітряних проміжків, наприклад, із застосуванням просторової сітки опорів [3].

Нині найбільш доцільним є використання розвинених програмних засобів тривимірного чисельного аналізу, наприклад, ANSYS. Так у роботі [5] розглянуто скінченно-елементну модель реактора порівняно малої потужності, в якому основна обмотка розташована на стрижні, а допоміжні – на бічних ярах. Основним завданням вказаної роботи було визначення чисельним методом власних і взаємних індуктивностей неспіввісних обмоток, питання насичення сталі МС не розглядалися.

Застосовано два підходи до дослідження ЧРМР засобами ANSYS з використанням практичних методів чисельного моделювання електромагнітних процесів у силових трансформаторах і реакторах, розроблених і представлених авторами у [1].

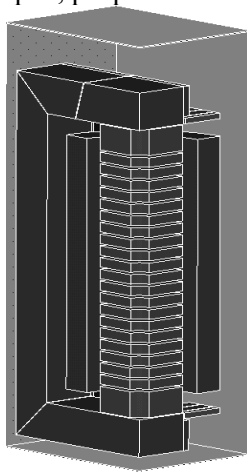


Рис. 2

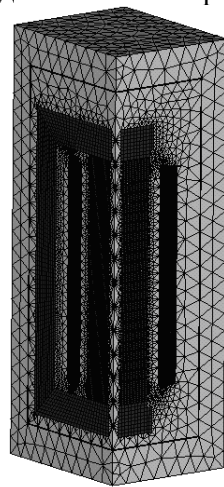


Рис. 3

**Перший підхід** полягає в розробці і дослідженні ЧРМР, яка в необхідній і достатній мірі для основної мети розрахунку базується на тривимірній конструкції реактора. Через умови симетрії реактора в моделі ANSYS використовується четверта частина його конструкції (рис. 2). Торцеві і вертикальні яра МС реактора, диски стрижня, магнітні шунти у торців обмоток представляються в ЧРМР спрощеними тривимірними тілами з анізотропними магнітними властивостями. У площині листів ЕТС магнітні властивості цих тіл описуються основною характеристикою намагнічування сталі  $B(H)$ . В ортогональному напрямі (по нормалі до площини листів) розрахунковим тілам задається постійне значення магнітної проникності  $\mu = \text{const}$ , яка визначається, як для шаруватого середовища "повітря-сталь", по відповідному коефіцієнту заповнення сталлю.

Через малий вплив на основне магнітне поле в області стрижня і обмоток бак реактора з конструктивної феромагнітної сталі представляється спрощено ізотропним тілом з постійним значенням магнітної проникності і з нульовою електричною провідністю. Ярмові балки не враховуються. Просторова триангуляція ЧРМР показана на рис. 3.

Прийняті допущення і умови формування ЧРМР дозволяють виконати розрахунок магнітного поля реактора методом статичного нелінійного аналізу [3].

Чисельний метод розрахунку вольт-амперної характеристики реактора полягає в наступному. Задається ряд  $k = 1, 2, \dots$  значень струму в обмотці  $I_k$ . Засобами ANSYS обчислюється розподіл індукції  $B_{v,k}$  у елементарних об'ємах  $v$  розрахункової області моделі і, з використанням відомого [1, 3] енергетичного визначення, – індуктивність реактора

$$L_k = \frac{2W_k}{I_k^2} = \frac{2}{I_k^2} \int_V \frac{B_{v,k}^2}{\mu_{v,k}(B_{v,k})} dv. \quad (6)$$

При обчисленні в (6) об'ємом інтеграції  $V$  є тривимірний об'єм усіх елементів ЧРМР (з урахуванням використововуваного коефіцієнта симетрії моделі). Через (1) обчислюється напруга  $U_k(I_k)$  і, зрештою, вольт-амперна характеристика реактора  $U_k(I_k)$  у табличній формі.

Використовуючи результати розрахунку магнітного поля реактора, охарактеризуємо завантаження магнітним потоком МС реактора при різних значеннях струму в обмотці. Розподіл індукції в перерізі МС реактора при номінальному струмі показано на рис. 4. Усереднювання в об'ємах дисків локальних величин індукції визначає в стрижні при номінальному струмі її середнє значення 1,39 Тл.

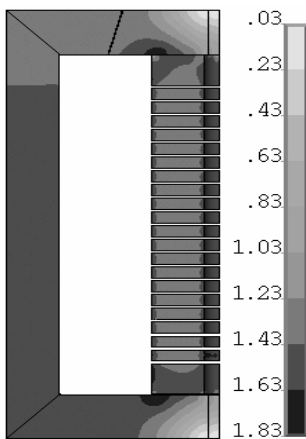


Рис. 4

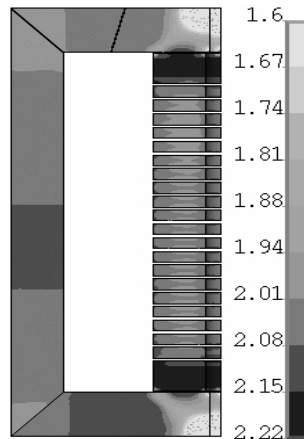


Рис. 5

тривимірного розподілу магнітного поля у віддалених від обмотки областях розташування ярем, бака і т.п. Це допущення дозволяє застосувати для задачі розрахунку індуктивності спеціальну вісесиметричну модель реактора – рис. 6. У такій постановці спрощується створення геометрії ЧРМР – аж до розробки автоматизованої моделі, зменшується час обчислень.

Стрижень МС реактора, як і в тривимірній моделі (рис. 2), представляється реальною конструкцією дисків з ЕТС. Обов'язковим є збереження площин перерізів ярем для збереження щільності магнітного потоку. Тому в радіальному напрямі осьовий розмір горизонтальних ярем є змінним, а для вертикальних ярем визначається їхній розрахунковий радіальний розмір. Поверхні баку представляються поверхнями зовнішнього циліндра з нульовим потенціалом у завданні граничних умов ANSYS. З урахуванням вказаної осьової симетрії моделі реактора формується умовно тривимірний сектор простору, на бічних площинах якого задаються умови симетрії.

На рис. 7 показано розподіл індукції в МС даної моделі реактора при номінальному струмі в обмотці. Визначено, що в стрижні МС середня індукція дорівнює 1,44 Тл, що близько до 1,39 Тл по рис. 4. Задані дискретні величини струму в обмотці і значення індуктивності по (6) дозволяють визначити табличну характеристику  $U_k(I_k)$ .

**Результати.** Для досліджуваного реактора при типових випробуваннях на ПАТ "ЗТР" для номінальних умов роботи визначена індуктивність 7,71 Гн. Аналітичним методом отримане значення індуктивності 7,95 Гн. ЧРМР дали наступні результати: 7,57 Гн – тривимірний сектор по рис. 2 і 7,78 Гн – модель по рис. 6. Найбільшу похибку розрахунку 3,1% має аналітичний метод.

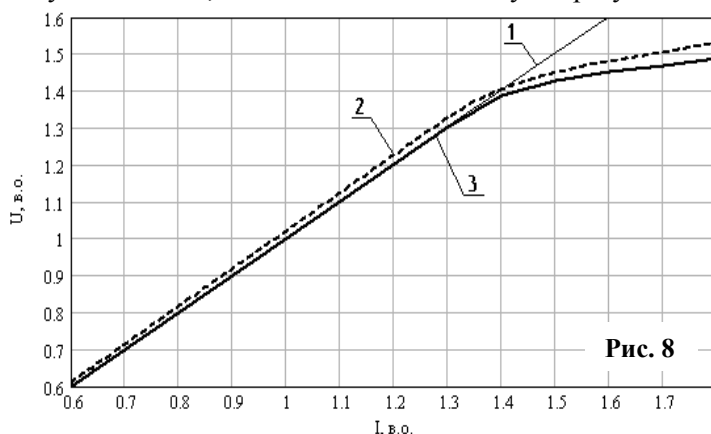


Рис. 8

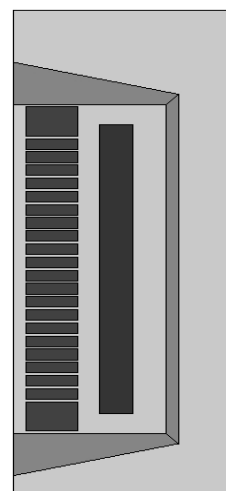


Рис. 6

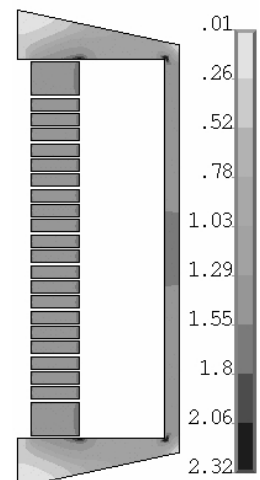


Рис. 7

При струмі кратністю 1,5 від номінального (рис. 5) середня індукція в стрижні дорівнює 2,06 Тл. При цьому в крайніх дисках за рахунок підвищених радіальних потоків обмотки індукція збільшується до локальних значень 2,22 Тл. Проявляється насичення стрижня і деяких ділянок ярем, що і призводить до перерозподілу магнітного поля, зчепленого з витками обмотки, в результаті – до зменшення індуктивності реактора.

**Другий підхід** ґрунтується на тому, що зчеплене з витками обмотки магнітне поле реактора має в основному осьову симетрію, і можна нехтувати особливостями

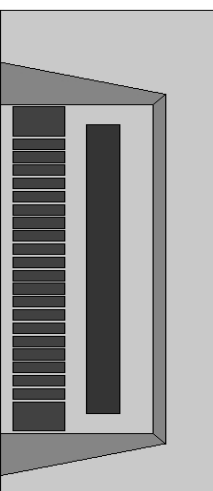


Рис. 6

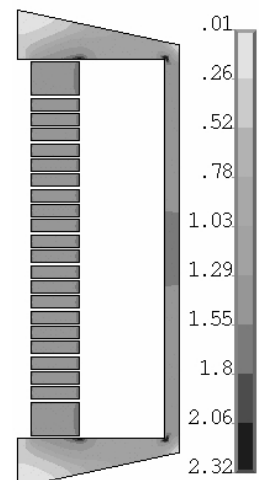


Рис. 7

На рис. 7 показано розподіл індукції в МС даної моделі реактора при номінальному струмі в обмотці. Визначено, що в стрижні МС середня індукція дорівнює 1,44 Тл, що близько до 1,39 Тл по рис. 4. Задані дискретні величини струму в обмотці і значення індуктивності по (6) дозволяють визначити табличну характеристику  $U_k(I_k)$ .

**Результати.** Для досліджуваного реактора при типових випробуваннях на ПАТ "ЗТР" для номінальних умов роботи визначена індуктивність 7,71 Гн. Аналітичним методом отримане значення індуктивності 7,95 Гн. ЧРМР дали наступні результати: 7,57 Гн – тривимірний сектор по рис. 2 і 7,78 Гн – модель по рис. 6. Найбільшу похибку розрахунку 3,1% має аналітичний метод.

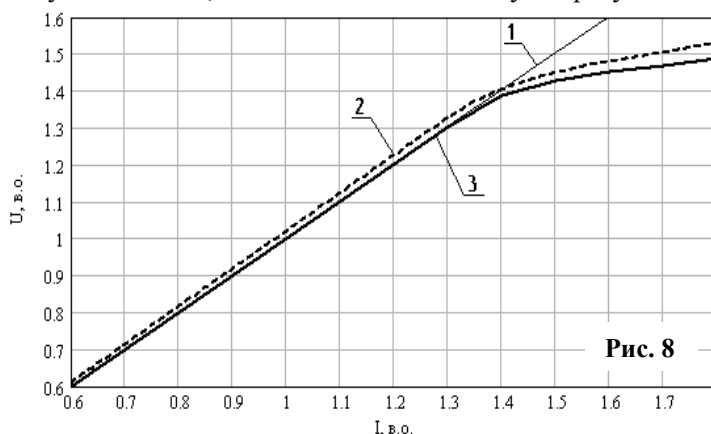


Рис. 8

У межах  $U' \leq 1,30$  реактор зберігає лінійну вольт-амперну характеристику з

невеликою різницею результатів розрахунку вказаними методами, що визначається незначною різницею значень індуктивностей у номінальному режимі (без насичення МС).

Визначено значення струму при максимальній кратності підвищення напруги до величини  $U' = 1,5$ . Різниця по струму від лінійного значення за рахунок насичення сталі МС реактора (для чисельної моделі) складає  $(1,82 - 1,5)/1,5 * 100 = 21 \%$ .

Аналітичний метод при цьому визначає менше відхилення від лінійного значення  $(1,71 - 1,5)/1,5 * 100 = 14 \%$ . За даними розрахунків і вимірів визначено, що ЧРМР забезпечують розрахунок індуктивності в діапазоні проведених вимірів з похибкою, що не перевищує 2,5 %.

**Висновок.** Авторами на ПАТ "ЗТР" розроблено із застосуванням програмного забезпечення ANSYS чисельні розрахункові моделі ШР, що враховують насичення ЕТС МС, забезпечують достатню для інженерних розрахунків точність визначення індуктивності і на цій основі – вольт-амперної характеристики реакторів в усьому діапазоні робочої і підвищеної напруги живлення реактора. Для оперативних оцінок прийнятним є застосування аналітичного метода з використанням спрощеної нелінійної схеми розподілу магнітних потоків ШР.

Для реактора потужністю 80 МВАр на напругу 765 кВ підтверджена його лінійна вольт-амперна характеристика до кратності 1,35 прикладеної напруги. При підвищеній напрузі характеристика є обмежено-лінійною. Ступінь нелінійності визначається значенням робочої індукції в магнітній системі реактора і кратністю прикладеної напруги.

Розроблені чисельні розрахункові моделі ШР в ANSYS застосовуються в ПАТ "Запоріжтрансформатор" при проектуванні устаткування, що поставляється для його роботи у високовольтних лініях електропередачі.

1. Басова А.В., Жук В.В., Иванков В.Ф., Кокошин С.С., Химюк И.В. Анализ электромагнитных и механических процессов в силовых трансформаторах и реакторах методом конечных элементов // Техн. электродинамика. Тематичний випуск «Проблеми сучасної електротехніки». – 2008. – Частина 3. – С. 9 – 14.
2. Лейтес Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. – М.: Энергия, 1981. – 392 с.
3. Туровский Я. Техническая электродинамика. – М.: Энергия. – 1968. – 456 с.
4. ANSYS software. Available at: <http://www.ansys.com>.
5. Xiang Cui, Huiqi Li, Lin Li and Jianxin Liu. Finite element analysis of shunt reactors with auxiliary windings // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2004. – No. 20. – Pp. 133 – 140.

#### РАСЧЕТ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ШУНТИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА С ЗАЗОРАМИ В СТЕРЖНЕ

В.Ф.Иванков, А.В.Басова, Н.В.Шульга

ПАО «Запоріжтрансформатор»,

Днепропетровское шоссе, 3, Запорожье, 69600, Украина.

email: [victor.ivankov@ztr.com.ua](mailto:victor.ivankov@ztr.com.ua)

Представлен расчет вольт-амперной характеристики реактора при насыщении магнитной системы как аналитическим методом, так и на основании численного конечно-элементного анализа с применением программного обеспечения ANSYS. Приведен пример расчета и измерений для однофазного реактора мощностью 80 МВАр на напряжение 765 кВ. Библ. 5, рис. 8.

**Ключевые слова:** шунтирующий реактор, вольт-амперная характеристика, аналитический метод, числовая модель ANSYS.

#### CALCULATION OF VOLT-AMPERE CHARACTERISTIC OF GAPPED-CORE SHUNT REACTOR

V.F.Ivankov, A.V.Basova, N.V.Shulga

PJSC "Zaporizhtransformator",

Dnipropetrovske shose, 3, Zaporizhia, 69600, Ukraine.

email: [victor.ivankov@ztr.com.ua](mailto:victor.ivankov@ztr.com.ua)

Determination of volt-ampere characteristic of the reactor is presented at magnetic system calculation, both by analytical method and based on numerical finite-element analysis with application ANSYS software. The example of calculation and measurement is provided for single-phase reactor rated for power 80 MVA, 765 kV. References 5, figures 8.

**Keywords:** volt-ampere characteristic, magnetic system, analytical method, numerical finite-element analysis, ANSYS software.

1. Basova A.V., Zhuk V.V., Ivankov V.F., Kokoshin C.C., Khimiuk I.V. Analysis of electromagnetic and mechanical processes in power transformers and reactors the method of eventual elements // Tekhnichna elektrodinamika. Tematychnyi vypusk «Problemy suchasnoi elektrotekhniki». – 2008. – Chastyna 3. – Pp. 9 – 14. (Rus)
2. Leites L.V. Electromagnetic calculations of transformers and reactors. – Moskva: Enerhiia, 1981. – 392 p. (Rus)
3. Turovskii Ya. Technical Electrodynamics. – Moskva: Enerhiia. – 1968. – 456 p. (Rus)
4. ANSYS software. Available at: <http://www.ansys.com>.
5. Xiang Cui, Huiqi Li, Lin Li and Jianxin Liu. Finite element analysis of shunt reactors with auxiliary windings // International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics. – 2004. – No. 20. – Pp. 133 – 140.

Надійшла 25.06.2014  
Остаточний варіант 15.10.2014